

# LOS RIESGOS DE IMPACTOS Y EXPLOSIONES

Alberto FRAILE DE LERMA<sup>1,2</sup>, Enrique ALARCÓN ÁLVAREZ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>. Departamento de Mecánica Estructural y Construcciones Industriales de la E.T.S. I. Industriales de la U.P.M.

<sup>2</sup>. Centro de Modelado de Ingeniería Mecánica (CEMIM)

## 1 EFECTO DE IMPACTOS SOBRE ESTRUCTURAS

Durante las últimas décadas, científicos e ingenieros han desarrollado un gran esfuerzo en la comprensión por los temas relacionados con el impacto entre cuerpos sólidos. Ejemplos de este tipo de problemas se presentan en diversos campos de la ingeniería como la industria de maquinaria, diseño de herramientas, fundiciones, armamento, diseño de vehículos y de las protecciones en las infraestructuras, explosiones (punto que se estudiará en un apartado posterior), etc.

La complejidad del desarrollo teórico y el desconocimiento acerca del comportamiento real de los materiales en problemas de carga rápida ha limitado tradicionalmente los problemas de impacto a geometrías muy concretas de los cuerpos incidentes, sin embargo, la evolución de la velocidad en los ordenadores y las mejoras en los métodos y elementos de instrumentación han aumentado el alcance y la fiabilidad de los datos experimentales y consecuentemente han sido un nuevo impulso en el estudio en este campo.

El enfoque actual de las normativas basado en el análisis de riesgos permite la posibilidad de abordar la seguridad estructural a través de modelos explícitos, en los que las variables básicas del problema se definen de forma estadística y la seguridad se fija en función de probabilidades de fallo frente a los estados límite. Los métodos de fiabilidad estructural deben ser capaces analizar toda la información estadística; es habitual el uso del método de Montecarlo, superficie de respuesta, estimaciones puntuales, nivel II, etc... y en todos ellos es fundamental el conocimiento de un procedimiento determinista que permita evaluar el grado de cumplimiento de los estados límite. En ésta presentación se entra directamente en los modelos deterministas de cálculo, obviando el estudio estadístico más propio de un capítulo destinado a la fiabilidad estructural.

En las siguientes páginas se han recogido unas ideas acerca de cómo se aborda el problema del impacto de una forma tradicional, se comienza con los choques elásticos e inelásticos de cuerpos rígidos. Los cuerpos rígidos dan paso a cuerpos elásticos donde la colisión genera una onda que recorre el cuerpo a una velocidad finita que se refleja en los contornos generando una vibración y en consecuencia una pérdida de energía en el choque. Posteriormente se abordará el impacto con materiales plásticos donde parte de la energía se transforma en la deformación permanente.

### 1.1 Choques de cuerpos rígidos

La teoría clásica de impactos de cuerpos rígidos se basa principalmente en los conceptos de conservación de la cantidad de movimiento y se caracterizan por la facilidad de su formulación numérica. Por el contrario, no aportan ninguna información acerca de las fuerzas, tensiones o deformaciones producidas en el contacto, limitándose a suministrar información acerca de la velocidad de los cuerpos antes y después del choque.

Para cuerpos perfectamente elásticos se emplea como segunda relación la ley de conservación de la energía, lo que permite deducir las velocidades finales de los cuerpos. Cuando el impacto produce una deformación permanente en alguno de los objetos esta relación se reemplaza mediante el concepto del coeficiente de restitución "e" del proceso. El coeficiente representa el grado de plastificación producido en la colisión, valores de e=0 indican la plastificación "perfecta" mientras que e=1 representa el choque perfectamente elástico.

El caso más sencillo se presenta en el choque de dos esferas con movimiento de translación y sin giro sobre su eje (Fig. 1.1). La ecuación de conservación de la cantidad de movimiento puede escribirse como sigue:

$$\sum_i m_i \vec{v}_i = cte \quad (1.1)$$

en la que

$m_i$  es la masa de cada uno de los elementos;  
 $\vec{v}_i$  es el vector velocidad de cada cuerpo.

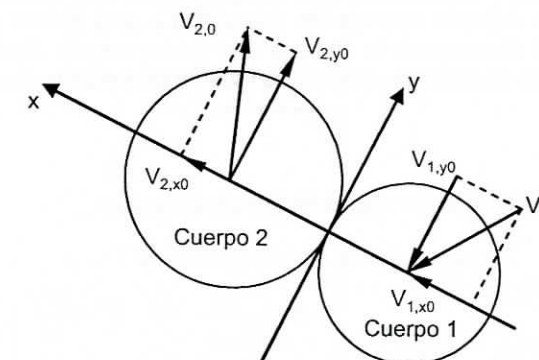


Fig. 1.1 Impacto de dos esferas con movimiento de translación

y la ecuación de conservación de la energía en el caso elástico se expresa:

$$\sum_i m_i |\vec{v}_i|^2 = cte \quad (1.2)$$

de donde es fácilmente deducible el valor de las velocidades finales en función de las iniciales teniendo en cuenta que las componentes de la dirección transversal deben conservarse antes y después del choque.

El planteamiento se puede generalizar si se define el coeficiente de restitución como cociente de las diferencias de velocidades entre los cuerpos en el estado final e inicial. Esta definición debe tomarse como una aproximación.

$$e = \frac{v_{2,xf} - v_{1,xf}}{v_{2,x0} - v_{1,x0}} \quad (1.3)$$

en la que

$v_{i,xj}$  es la velocidad del cuerpo i en la dirección x en el estado j (o inicial; f final)

La formulación del coeficiente de restitución implica una pérdida de energía en el choque ( $\Delta T$ ) reescribiéndose la ecuación de equilibrio según sigue:

$$\sum_i m_i v_{i,x0}^2 = \sum_i m_i v_{i,xf}^2 + \Delta T \quad (1.4)$$

La pérdida de energía cinética se puede obtener mediante las expresiones anteriores, obteniéndose una relación en función del coeficiente de restitución y la situación anterior al choque, esto es:



$$\Delta T = \frac{1}{2} \left( \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \right) (1 - e^2) (v_{1,x0} - v_{2,x0})^2 \quad (1.5)$$

Evidentemente el choque elástico con  $e=1$  implica la conservación de energía mientras que el choque inelástico perfecto  $e=0$  implica un máximo de la expresión anterior. Curiosamente para unas condiciones iniciales del problema en velocidad y coeficiente de restitución la pérdida de energía queda definida por un juego o relación entre las masas, efecto conocido y aplicado en diferentes problemas en la ingeniería como es la hincada de pilotes mediante golpeo.

El coeficiente de restitución generalmente se define como una propiedad del material, sin embargo, el estudio experimental o analítico incluyendo el efecto de la vibración en el medio permite observar su dependencia con las masas, formas y velocidades con las que inciden los cuerpos. Experimentalmente el valor de  $e$  se puede determinar dejando caer desde una altura  $h$  una esfera sobre una mesa plana de gran masa y del mismo material observando la altura  $h^*$  del primer rebote. Aplicando el principio de conservación de la energía la pérdida de energía cinética es igual al incremento de energía potencial.

$$\Delta T = m_1 g (h - h^*) \quad (1.6)$$

El coeficiente de restitución se determina de nuevo igualando energías:

$$\left. \begin{aligned} T_o &= \frac{1}{2} m_1 v_{1,o}^2 = m_1 g h \Rightarrow v_{1,o} = \sqrt{2gh} \\ T_f &= \frac{1}{2} m_1 v_{1,f}^2 = m_1 g h^* \Rightarrow v_{1,f} = \sqrt{2gh^*} \end{aligned} \right\} e = \frac{-v_{1,f}}{v_{1,o}} \Rightarrow e^2 = \frac{h^*}{h} \quad (1.7)$$

Cuando los cuerpos que intervienen en la colisión tienen diferentes propiedades el coeficiente de restitución conjunto puede determinarse a partir de los coeficientes  $e_1$  y  $e_2$  correspondientes al choque de cada uno de los cuerpos sobre su mismo material 1 y 2 y de los módulos de Young de los materiales  $E_1$  y  $E_2$ .

$$e = \frac{e_1 E_2 + e_2 E_1}{E_1 + E_2} \quad (1.8)$$

Un planteamiento moderno que incluye otros tipos de impacto de cuerpos rígidos con geometrías y movimientos diversos pueden encontrarse en la ref.6.

## 1.2 Choques de cuerpos elásticos. Vibraciones

En el apartado anterior se ha descrito un ejemplo sencillo del choque entre cuerpos rígidos, caracterizado por el cambio instantáneo de la sollicitación debido al impacto puntual. En realidad la alteración generada por el contacto se transmite al interior de los cuerpos a una velocidad finita y se refleja en los contornos produciendo oscilaciones lo que provoca que en cada sección del cuerpo la sollicitación sea diferente y cambiante en el tiempo. En este apartado se intenta profundizar en éste aspecto tomando como referencia sistemas lineales sencillos.

La exposición aborda un modelo de un grado de libertad sometido a un impulso lo que permite explicar uno de los métodos de cálculo que se presenta en el Eurocódigo al que se hace referencia desde el nuevo CTE.

El sistema de un grado de libertad en principio no amortiguado se caracteriza por su masa  $M$  y su rigidez  $k$ . El equilibrio de fuerzas permite escribir la ecuación que describe el movimiento ante una sollicitación variable en el tiempo  $F(t)$ :

$$M \ddot{y} + k y = F(t) \quad (1.9)$$

La característica dinámica más importante del sistema es su periodo natural que define la repetición armónica del movimiento en vibración libre, su expresión:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{k}} \quad (1.10)$$

La solución del sistema ante una sollicitación de tipo impulso tiene dos etapas: inicialmente una vibración forzada, durante el tiempo en que se aplica la carga, donde la reacción en el modelo dinámico depende de la representación de la propia carga y de las características dinámicas del problema y, posteriormente, el movimiento en vibración libre, caracterizado por las condiciones iniciales expresadas en términos de desplazamiento y velocidad, tomadas por continuidad del estado final de la fase anterior.

Por ejemplo, si se toma el impulso como una carga uniforme  $F_i$  en un intervalo de tiempo  $t_d$  (Fig. 1.2), el resultado de la integración de la ecuación (1.9) suponiendo que se parte de una situación en reposo es:

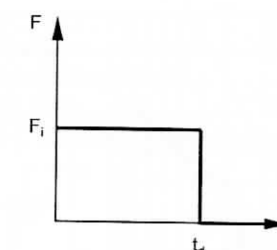


Fig. 1.2 Impulso de tipo rectangular

$$\begin{aligned} y(t) &= \frac{F_i}{k} \left( 1 - \cos 2\pi \frac{t}{T} \right) & t \leq t_d \\ y(t) &= \frac{F_i}{k} \left( \cos 2\pi \frac{t-t_d}{T} - \cos 2\pi \frac{t}{T} \right) & t \geq t_d \end{aligned} \quad (1.11)$$

Para observar los diferentes aspectos de la ecuación es conveniente definir el Factor de Carga Dinámica (DLF de las siglas en inglés Dynamic Load Factor), como cociente entre deformada dinámica y estática para cada instante de tiempo, esto es:

$$DLF = \frac{y}{y_{est}} = \frac{y}{F_i/k} = \frac{k y}{F_i} \quad (1.12)$$

La representación del DLF se plantea frente al tiempo adimensionalizado por el periodo del sistema dinámico, lo que se muestra en la Fig. 1.3 para dos relaciones del cociente entre la duración del impulso y el periodo natural.

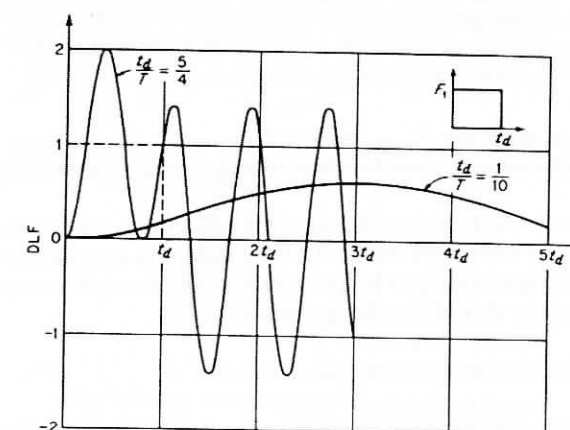


Fig. 1.3 Ejemplos de la respuesta dinámica de un sistema de un grado de libertad no amortiguado frente a un impulso de tipo rectangular



Como se puede apreciar esta relación es de gran importancia para describir el efecto del impacto. Para valores próximos a cero el factor de carga dinámica máximo y en consecuencia el desplazamiento máximo tiende a cero. Por tanto, para atenuar la respuesta de un sistema dinámico, si se considera un impacto determinado y el valor de  $t_d$  fijo, es necesario aumentar el periodo del sistema dinámico, lo que se consigue aumentando su masa y/o reduciendo su rigidez.

Si se observan las expresiones (1.11) se puede deducir que el valor máximo del DLF es 2 y se produce para cualquier relación  $t_d/T > 0.5$ . La Fig. 1.4 presenta los valores máximos de DLF para diferentes relaciones  $t_d/T$  y la Fig. 1.5 presenta el tiempo  $t_m$  en el que se produce el valor máximo, donde para una carga determinada es posible obtener la respuesta conociendo el periodo natural del sistema dinámico. Adicionalmente en la mismas gráficas se aprecia la comparación con una segunda idealización triangular del impulso.

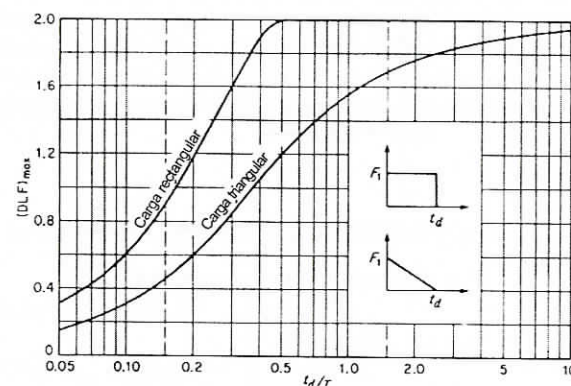


Fig. 1.4 Respuesta máxima de un sistema de un grado de libertad no amortiguado frente a un impulso de tipo rectangular y triangular

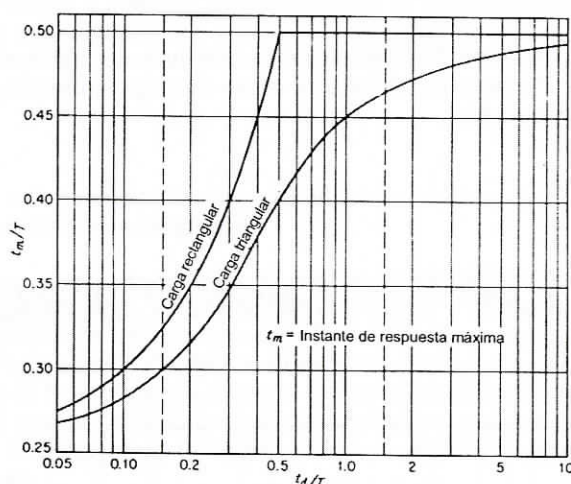


Fig. 1.5 Tiempo  $t_m$  en el que se produce la respuesta máxima de un sistema de un grado de libertad no amortiguado frente a un impulso de tipo rectangular y triangular

En el estudio anterior no se ha incluido el amortiguamiento de forma intencionada ya que su efecto finalmente tiene poca importancia. El valor máximo del DLF se presenta generalmente en el primer pico de la vibración y el valor del amortiguamiento que habitualmente se encuentra en las estructuras no es suficiente para producir una reducción importante de la respuesta.

El estudio de sistemas discretos puede ampliarse en la ref. 2.

El CTE (ref. 12) en su articulado clasifica las diferentes situaciones de proyecto en función de los efectos provocados, que pueden ser de consecuencias limitadas, medias o graves lo que en principio parece algo ambiguo. Para la primera categoría no es necesario cálculo y aconseja un cuidado general en el proyecto y ejecución de la estructura; para el segundo tipo propone emplear modelos de fuerzas estáticas equivalentes que incluye en el articulado y que permiten la representación de la acción generada por el impacto de diferentes elementos (tráfico rodado, ferroviario, helicópteros,...) sobre las estructuras: finalmente, las

situaciones graves requieren modelos refinados proponiendo como ejemplo en el caso de impactos de vehículos el método indicado en el anejo A del Eurocódigo ENV 1991-2-7:1998 (ref. 13).

Dicho método consiste en el estudio del impacto del vehículo representado por una barra sobre la estructura suponiéndola rígida e inmóvil (Fig. 1.6). Las expresiones para la fuerza de interacción y duración de la carga son:

$$\begin{aligned} F &= v_r \sqrt{k m} \\ \Delta t &= \sqrt{m/k} \end{aligned} \quad (1.13)$$

en la que

$v_r$  es la velocidad del impacto;  
 $k$  es el rigidez del sistema vehículo:  $EA/L$ ;  
 $m$  es la masa del vehículo:  $\rho AL$ ;  
 $\rho, E, A, L$  son las propiedades del vehículo, densidad, módulo de Young, área y longitud, respectivamente.

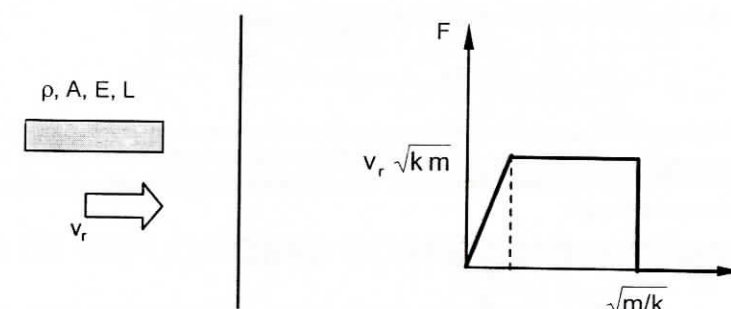


Fig. 1.6 Modelo del impacto del vehículo sobre la estructura

La envolvente superior de la solución se presenta si se toma la barra como elemento elástico y la carga rectangular, obteniéndose el resultado máximo mostrado más arriba  $(DLF)_{max} = 2$ , sin embargo la normativa aconseja el uso de modelos dinámicos no-lineales que reducen notablemente la respuesta.

### 1.3 Choques de cuerpos con deformaciones plásticas

Cuando en un choque alguno de los cuerpos que entran en contacto adquiere deformaciones de carácter no reversible se produce una pérdida de la energía cinética en forma de deformación acompañado de una reducción de las variables respuesta del sistema.

Una aplicación sencilla puede realizarse con el mismo sistema empleado en el apartado anterior, considerando un comportamiento elato-plástico del material, según la ley mostrada en la Fig. 1.7.

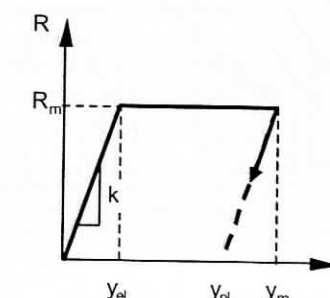


Fig. 1.7 Ley de comportamiento del material

La respuesta del sistema ante una carga uniforme tendrá tres estados: en primer lugar el comportamiento será elástico con rigidez  $k$ , hasta alcanzar el límite elástico para un desplazamiento  $y_{el}$ ; la segunda etapa es comportamiento plástico donde aumenta el valor del desplazamiento sin aumento de carga ( $R=R_m$ ),



hasta el valor máximo del desplazamiento  $y_m$ ; finalmente, la carga decrece por una rama paralela a la elástica inicial quedando oscilando por debajo del valor máximo  $y_m$ .

Para determinar la respuesta del sistema en los estados 2 y 3 es necesario conocer la situación final en desplazamientos y velocidad de los estados previos. Si la carga aplicada no es uniforme, el número de estados aumenta en función del número de discontinuidades consideradas.

En el caso de un impulso rectangular (Fig. 1.2) las etapas anteriores se ven afectadas por el nivel  $F_1$  y el tiempo del impulso  $t_d$ . El equilibrio final se alcanza con una oscilación libre en torno a la deformación permanente  $y_{pl}$ . Sin embargo, la variable más importante desde el punto de vista del proyectista es el valor máximo del desplazamiento, objetivo que de forma genérica se puede alcanzar realizando un cambio de variable para trabajar con magnitudes adimensionales.

$$\left. \begin{aligned} \xi &= \frac{t}{T} \\ \eta &= \frac{y}{y_{el}} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \ddot{y} = \frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{y_{el}}{T^2} \frac{d^2 \eta}{d\xi^2} = \frac{y_{el}}{T^2} \ddot{\eta} \quad (1.14)$$

Con lo que la ecuación del movimiento en zona elástica puede escribirse:

$$M \ddot{y} + k y = F(t) \Rightarrow \frac{1}{4\pi^2} \ddot{\eta} + \eta = \frac{F(\xi)}{R_m} \quad (1.15)$$

en situación plástica el término que incluye la rigidez del sistema dinámico es constante e igual a  $R_m$ . La expresión adimensional resultante es:

$$M \ddot{y} + R_m = F(t) \Rightarrow \frac{1}{4\pi^2} \ddot{\eta} + 1 = \frac{F(\xi)}{R_m} \quad (1.16)$$

Las ecuaciones anteriores ponen de manifiesto que en el caso de la carga rectangular las magnitudes que rigen la respuesta son el cociente  $F_1/R_m$  para la carga y  $t_d/T$  para el tiempo en caso de que el sistema parta de una condición inicial de reposo. En función de estas relaciones es posible construir el gráfico de la Fig. 1.8, que representa el valor del desplazamiento máximo  $y_m$ . De igual forma, la Fig. 1.9 muestra el instante de tiempo en que se alcanza el valor máximo. En ambas se puede apreciar que el valor de la relación  $F_1/R_m=2$  es la frontera para el comportamiento elástico en todo el dominio.

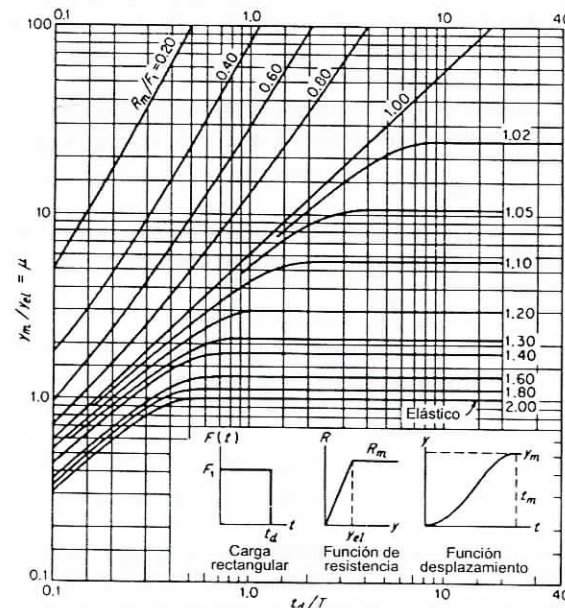


Fig. 1.8 Respuesta máxima de un sistema elasto-plástico de un grado de libertad no amortiguado frente a un impulso de tipo rectangular

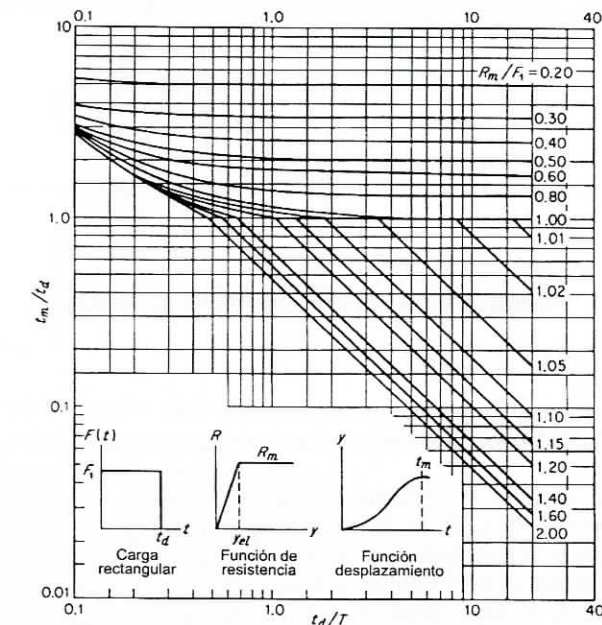


Fig. 1.9 Tiempo  $t_m$  en el que se produce la respuesta máxima de un sistema elasto-plástico de un grado de libertad no amortiguado frente a un impulso de tipo rectangular

## 2 EFECTO DE EXPLOSIONES SOBRE ESTRUCTURAS

Las explosiones pueden ser tratadas de forma análoga al impacto, ya que poseen la misma característica de cargas rápidas y son consideradas solicitaciones accidentales. La diferencia fundamental se centra en que los impactos requieren la existencia de dos cuerpos mientras que las explosiones sólo requieren un receptor y es el medio transmisor, generalmente el aire, quien transmite la solicitación mediante una onda de presión.

En las siguientes líneas se comentan diferentes aspectos de la naturaleza de la solicitación y de su efecto sobre las estructuras.

### 2.1 Evolución de la onda de choque

La liberación de energía que se produce durante las explosiones ocasiona una serie de fenómenos que afectan de modo directo a las estructuras situadas en sus proximidades. Cuando se produce una explosión en la atmósfera se genera una onda de presión que progresa de forma esférica hasta que encuentra la superficie del suelo o contornos de alguna edificación.

Ante una situación en campo libre (Fig. 2.1) la onda al llegar al suelo se refleja y en primera aproximación presenta un centro simétrico al del punto de explosión. En consecuencia, el punto O' estará sometido a una explosión doble del resto de los puntos. A medida que aumenta el ángulo  $\alpha$  la onda reflejada progresa más rápidamente que la incidente. El resultado es la formación de un frente M en el que las presiones se duplican, denominado frente de Mach.



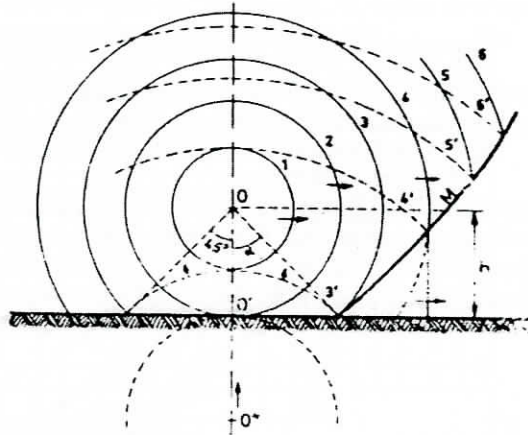


Fig. 2.1 Evolución de la onda de choque en campo libre

En los puntos situados bajo la curva M la evolución de las presiones en el espacio y tiempo presenta la forma de la Fig. 2.2. Si se fija un instante de tiempo  $t=t_1$  y se estudia la presión según la distancia se observa la presencia de una presión pico que cae rápidamente al acercarse al punto O' proyección del pico explosivo. Presión que se hace incluso negativa y finalmente vuelve a anularse. Debido a estas diferencias de presión las ondas van acompañadas de vientos, sucesivamente en direcciones opuestas, que afectan gravemente a las estructuras de las edificaciones próximas.

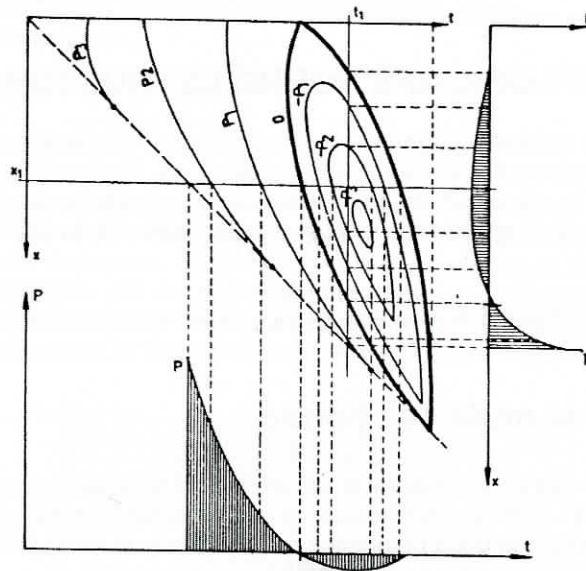


Fig. 2.2 Evolución espacial y temporal de la presión en una explosión por debajo de la curva M

Si se fija un punto de la variable espacial  $x=x_1$  el fenómeno es análogo pero progresando con el tiempo de forma diferente. En el plano  $x-t$  el lugar de las presiones pico es precisamente la recta que define la velocidad de progresión del frente de Mach; se observa que a medida que se aleja de O', el valor absoluto de dicha presión pico va disminuyendo.

La velocidad de propagación del frente de onda se puede definir según la expresión:

$$U = U_s \left( 1 + \frac{6 P_{so}}{7 P_o} \right) \quad (2.1)$$

en la que

$U_s$  es la velocidad del sonido;  
 $P_{so}$  es la sobrepresión pico;  
 $P_o$  es la presión atmosférica

Los puntos situados por encima de la curva M sufren dos impulsos sucesivos correspondientes a la llegada de las presiones incidente y reflejada (Fig. 2.3). La presión máxima se alcanza cuando llega la segunda.

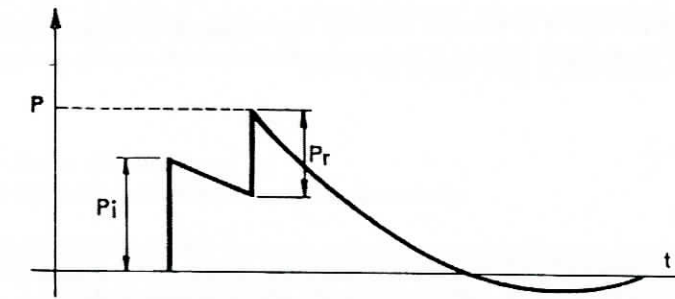


Fig. 2.3 Evolución temporal de la presión por encima de la curva M

## 2.2 Efectos sobre las estructuras

Cuando la onda de presión encuentra un obstáculo en su camino se produce sobre éste una serie de fenómenos de arrastre de mayor complejidad en función de la geometría del obstáculo. Si el edificio es rectangular la onda lo envuelve progresivamente según se muestra en la Fig. 2.4. La carga total que recibe la estructura se ve afectada de tres componentes, la reflexión de la onda similar a lo explicado para suelo, la propia sobrepresión del frente de onda y fuerzas de arrastre. Las dos primeras se trata de presiones estáticas mientras que la segunda corresponde a la presión dinámica.

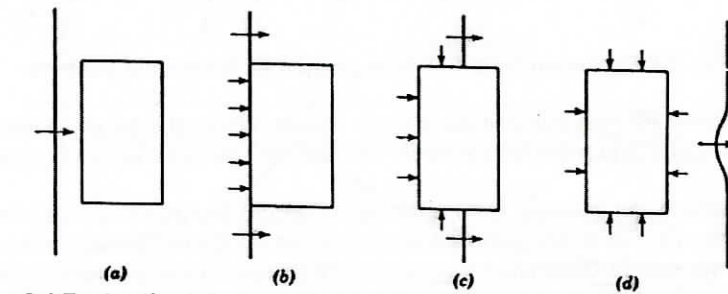


Fig. 2.4 Evolución de la onda de presión en torno a un edificio rectangular

La máxima presión se produce en el instante b) donde existe el fenómeno de reflexión,

$$P_t = P_{so} \left( 2 + \frac{6 P_{so}}{7 P_o + P_{so}} \right) \quad (2.2)$$

La expresión anterior es válida para superficies normales al frente de propagación, en caso contrario el valor disminuye, sin embargo, hasta ángulos en torno a  $35^\circ$  la disminución no es relevante por lo que la expresión se puede emplear para ángulos inferiores. La evolución de la presión con el tiempo se muestra en la Fig. 2.5.

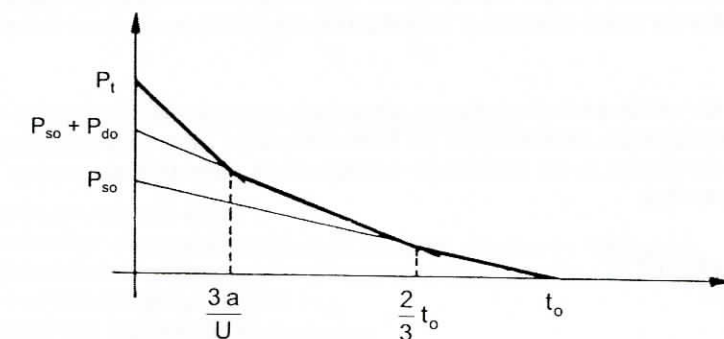


Fig. 2.5 Evolución temporal de la presión en la fachada frontal



El instante  $3a/U$  se denomina tiempo de deslinde ya que en ese momento desaparecen los fenómenos de reflexión.  $a$  es la distancia entre el punto de la fachada considerado y la esquina del edificio más próximo y  $U$  es la velocidad definida más arriba.

Una vez alcanzado el instante  $3a/U$  la presión sobre la superficie es la superposición de los efectos de sobrepresión y las fuerzas de arrastre debida a la presión dinámica del aire  $P_d$  que sigue una ley análoga a la de  $P_t$ .

$$P_d = P_{do} \left(1 - \frac{t}{t_{od}}\right)^2 e^{-2 \frac{t}{t_{od}}} \quad (2.3)$$

En la fachada posterior la presión es similar a la mostrada en la Fig. 2.6. La fuerza total sobre el edificio es la diferencia entre ambas y el techo se supone sometido sólo a la acción de  $P_t$ .

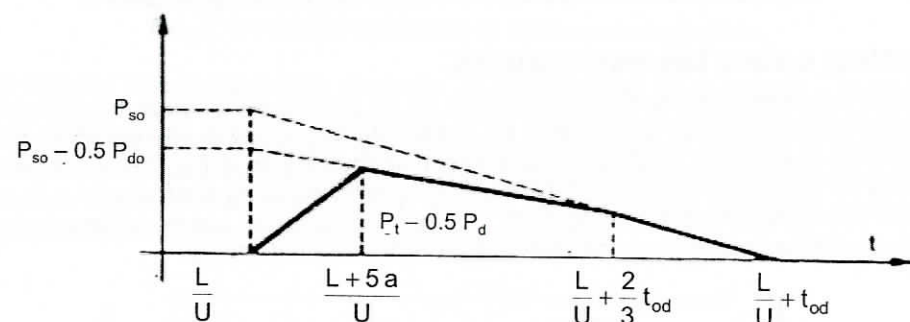


Fig. 2.6 Evolución temporal de la presión en la fachada posterior

Naturalmente el fenómeno es más complicado puesto que en las esquinas se forman remolinos que forman una onda perpendicular a la primitiva (onda de rarefacción) tanto en las fachadas como en el techo.

Cuando se trata de estructuras abiertas (p.e: puentes) el efecto es debido casi exclusivamente a la presión dinámica del viento, ya que la brevedad de acción de las ondas incidente y reflejada hace despreciables sus efectos. Puesto que la dimensión transversal de la estructura (perpendicular al frente de onda) es pequeña, se evalúan las fuerzas que actúan sobre todos los elementos de la estructura y se suman para obtener la fuerza total. Análogamente al tratamiento habitual para solicitaciones de viento se define un coeficiente de arrastre  $C_d$ , siendo la presión de arrastre:

$$P_d = C_d \frac{\rho A v^2}{2} \quad (2.4)$$

El CTE excluye de su articulado a las acciones derivadas de la voluntad humana en las que incluye las explosiones externas. Desde este punto de vista sólo considera las explosiones interiores a las edificaciones, principalmente por la acumulación de gas de uso doméstico. En este sentido además de dar consejos prácticos sobre la disposición de elementos que permitan limitar el efecto de las explosiones trata el problema al igual que con los impactos en función de los efectos que puedan ocasionar. Para situaciones medias recurre a un sistema de cargas equivalentes mientras que las situaciones graves requieren modelos refinados proponiendo como ejemplo el método indicado en el anejo B del Eurocódigo ENV 1991-2-7:1998.

El método planteado es válido para explosiones de polvos y emplea el parámetro  $K_{st}$  dependiente del material para definir la explosión, determinado de forma empírica, cuyos valores quedan recogidos en el apéndice. La presión de diseño  $p_d$  se calcula en función de la superficie de venteo  $A_v$  con la siguiente expresión obtenida para silos:

$$A_v = \frac{4.5 \cdot 10^{-5} K_{st} K_{h/d} V^{0.77}}{p_d^{0.57}} \quad (2.5)$$

en la que

$V$  es el volumen en  $m^3$  del recinto;  
 $K_{h/d}$  se obtiene según:

$$K_{h/d} = \begin{cases} 1 + \ln\left(\frac{h}{d}\right)(4 - 0.8 \ln p_d) & \text{para } 20 \text{ kN/m}^2 \leq p_d \leq 150 \text{ kN/m}^2 \\ 1 & \text{para } 150 \text{ kN/m}^2 \leq p_d \leq 200 \text{ kN/m}^2 \end{cases} \quad (2.6)$$

siendo:

$h$  es la altura del recinto en m;  
 $d$  es el diámetro o diámetro equivalente del silo

Las dos expresiones anteriores conforman una relación no explícita para la obtención de  $p_d$  que debe ser determinada de forma iterativa. Otra forma de enfocar el proyecto es dimensionando los elementos estructurales para una determina presión de proyecto  $p_d$  y determinar así el área de venteo según las relaciones anteriores.

El uso del venteo o alivio de la presión que se genera durante una explosión es una de las medidas mas conocidas y utilizadas para proteger equipos, instalaciones y estructuras, y se basa en la disposición de equipos de paneles de ruptura (ventanas, tabiques en las estructuras), que tienen una presión predeterminada que les permite saltar instantáneamente, de forma predecible y sin resistencia frente a la presión. En cuanto a su ubicación hay que tener en cuenta que en el proceso puede existir emisión de gases y llamas y por tanto deben conducir a zona segura.

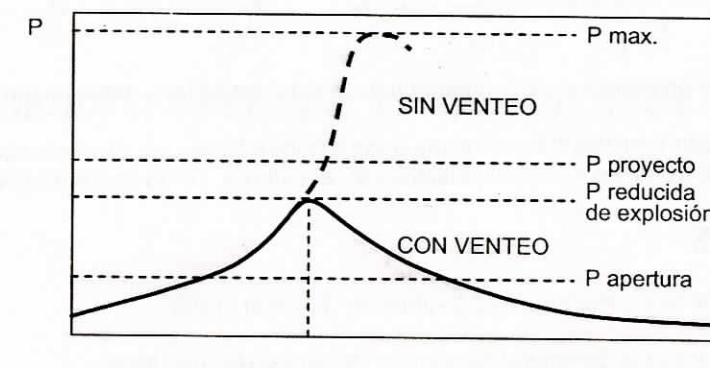


Fig. 2.7 Valor de la presión máxima en función de la posibilidad de venteo

En explosiones en túneles se distingue entre explosiones con detonación (velocidad supersónica) y deflagraciones (velocidad subsónica). Las expresiones en el primer que definen la variación de la presión en el tiempo son:

$$p(x,t) = p_0 e^{-\frac{t - |x|/c_1}{t_0}} \quad \text{para } \frac{|x|}{c_1} \leq t \leq \frac{|x|}{c_2} - \frac{|x|}{c_1}$$

$$p(x,t) = p_0 e^{-\frac{|x|/c_1 - 2|x|/c_2}{t_0}} \quad \text{para } \frac{|x|}{c_2} - \frac{|x|}{c_1} \leq t \leq \frac{|x|}{c_2} \quad (2.7)$$

$p(x,t) = 0$  para el resto de condiciones

siendo:

$p_0$  la presión pico ( $2000 \text{ kN/m}^2$ );  
 $c_1$  es la velocidad de propagación de la onda de choque ( $\sim 1800 \text{ m/s}$ );  
 $c_2$  es la velocidad de propagación del sonido a temperatura caliente ( $\sim 800 \text{ m/s}$ );  
 $t_0$  es una constante temporal ( $0.01 \text{ s}$ );  
 $|x|$  es la distancia al punto de la explosión

En el caso de deflagración la historia temporal de la presión es:

$$p(x,t) = 4 p_o \frac{t}{t_o} \left( 1 - \frac{t}{t_o} \right) \quad \text{para } 0 \leq t \leq t_o \quad (2.8)$$

donde:

$p_o$  la presión pico (100 kN/m<sup>2</sup>);  
 $t_o$  es una constante temporal (0.1 s);

La representación de las expresiones anteriores queda recogida en la Fig. 2.8.

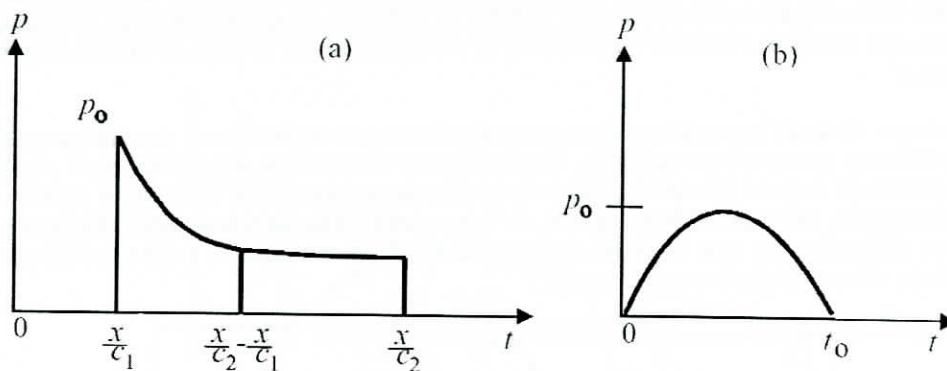


Fig. 2.8 Evolución temporal de la presión para detonaciones (a) y deflagraciones (b)

Particularmente la evolución correspondiente a las detonaciones tiene una gran similitud con la presión incidente sobre superficies frontales en las explosiones en el exterior, como se ha mostrado más arriba.

### 3 REFERENCIAS

1. W.E. Baker et al. "Explosions Hazards and Evaluation" Elsevier. 1988.
2. John M. Biggs "Introduction to Structural Dynamics". McGraw-Hill, Inc. 1964.
3. P.S. Bulson "Explosive Loading of Engineering Structures" SPON. 1997.
4. Roger Chéret "La détonation des explosifs condensés" (2.vol). Masson. 1988.
5. Edward Courath et al. "Structural Design for Physical Security". ASCE. 1999.
6. Werner Goldsmith "Impact. The Theory and Physical Behaviour of Colliding Solids". Dover Publications, Inc. Mineola, New York. 2001.
7. Miguel Ángel Hacar-Enrique Alarcón "Elementos de dinámica aplicada a las estructuras". Edix. 1971.
8. Josef Henrich "The Dynamics of Explosions and Its Use" Elsevier. 1979.
9. Gilbert Kinney et al. "Explosions Shocks in Air" Springer. 1985
10. Charles Mader "Numerical Modelling of detonations" Univ. of California Press. 1979.
11. E. Yandzio et al. "Protection of Buildings against Explosions" SCI.1999.
12. Borrador del Código Técnico de la Edificación (CTE). "Seguridad estructural. Acciones en la edificación". 2003.
13. Eurocódigo ENV 1991-2-7:1998. EUROCODE 1: "Basis of design and actions on structures"; Part 2-7: "Accidental actions due to impact and explosions". Final Draft June 1998.